



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA VYSOKORYCHLOSTNÍCH
VIDEOZÁZNAMŮ PROCESU ROZPRAŠOVÁNÍ U
TLAKOVÝCH VÍŘIVÝCH TRYSEK**

PROCESSING AND ANALYSIS OF HS VIDEORECORDS OF LIQUID ATOMIZATION FOR A PRESSURE-SWIRL NOZZLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Červenec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Adam Červenec**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zpracování a analýza vysokorychlostních videozáznamů procesu rozprašování u tlakových vířivých trysek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proces rozstřiku kapaliny z trysky je složitým dějem dvoufázového disperzního proudění, při němž dochází k postupnému tříštění objemu kapaliny na menší struktury a končí vznikem malých kapek. Jejich pohyb je ovlivňován okolním prostředím, dochází ke vzájemné interakci a dalšímu tříštění či naopak shlukování. Toto ovlivňuje výslednou strukturu spreje.

Pro konkrétní tlakovou vířivou trysku byla provedena sada videozáznamů spreje vysokorychlostní kamerou Photron FASTCAM SA-Z. Tyto makro-záznamy dokumentují pohyb kapek ve spreji, jejich interakci s okolním vzduchem a dalšími kapkami.

Předmětem práce je zpracování a analýza: rychlosti a trajektorie pohybu a deformace kapalných struktur a kapek, popis a klasifikace kolizí mezi kapkami.

Součástí práce je účast na dalších experimentech tohoto druhu.

Cíle bakalářské práce:

- seznámení se s technikou pro vysokorychlostní obrazový záznam, specifikace použitých komponent, popis experimentu,
- obecný popis pohybu kapek, interakce s okolním prostředím, vzájemné interakce kapek,
- zpracování a fotogrammetrická analýza vybraných záznamů rozprašování: popis a klasifikace kolizí mezi kapkami (typ kolizí, velikosti kapek), stanovení rychlosti (trajektorie) pohybu a deformace kapalných struktur a kapek,
- fyzikální popis získaných výsledků a závěry s ohledem na zkoumaný problém,
- účast na experimentech prováděných s tryskami, příprava zařízení a optimalizace nastavení (objekt, kamera, osvětlení) pro zvolený problém,
- pořízení vlastního záznamu a jeho analýza, dokumentace experimentu.

Seznam doporučené literatury:

MÁDR, V. Rozprašování a spalování kapalných paliv. Aleko, 1994

BRENNEN, C. E. Fundamentals of multiphase flow. New York: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521848040.

SIRIGNANO, W. A. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521884896.

PAVELEK, M., E. JANOTKOVÁ a J. ŠTĚTINA. Vizualizační a optické měřicí metody [online]. 2. vydání. Brno, 2007 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika>

KRISHNAN, K.G. a E. LOTH. Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes. International Journal of Multiphase Flow[online]. 2015, 77, 171-186 [cit. 2016-11-14]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.08.003. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932215001755>

SANTOLAYA, J. L., J. A. GARCÍA, E. CALVO a L. M. CERECEDO. Effects of droplet collision phenomena on the development of pressure swirl sprays. International Journal of Multiphase Flow [online]. 2013, 56, 160-171 [cit. 2016-11-14]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.06.007. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932213000943>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá procesom rozprašovania u tlakových vírivých trysiek. Predmetom skúmania bol kvapalinový kužel, ktorý sa postupne triešti na menšie štruktúry a končí vznikom malých kvapiek. Na začiatku bolo potrebné oboznámiť sa s teóriou prúdenia kvapaliny, pohybu kvapiek a vplyvu geometrie trysky. Po ukončení teoretickej časti sa uskutočnil experiment, ktorý zahrňoval prípravu prístrojov a vytvorenie vlastných záznamov pomocou vysokorýchlostnej kamery Photron FASTCAM SA-Z. Kamera nám poskytla detailný pohľad na sprej a udalosti, ktoré sa v ňom odohrávajú, ako sú napríklad zrážky, ktoré sú hlavným predmetom tejto práce. Následne prebehla analýza záznamov, z ktorých boli vyvedené závery s ohľadom na skúmaný problém.

Kľúčové slová

Sprej, tlaková vírivá tryska, kvapky, rozpad, zrážka, odraz, štádiá spreja, kvapalný film

Abstract

This bachelor thesis deals with processes of liquid atomization for a pressure-swirl nozzle. The main goal was to study liquid cone, which is gradually fragmenting on smaller parts ending in creating small droplets. It was needed to study theory of liquid flow, motion of droplets and an impact of the geometry of nozzle. When the theoretical part ended we could perform an experiment, which consists of preparing devices and creating own video records using highspeed camera Photron FASTCAM SA-Z. The camera provided us detailed view on the spray and events, for example collisions of droplets, which are the main subject of this thesis. Afterwards the video records were analyzed and we could provide results connected with studied problem.

Keywords

Spray, pressure-swirl nozzle, droplets, breakup, collision, rebound, stages of spray, liquid sheet

Bibliografická citácia

ČERVENEC, A. Zpracování a analýza vysokorychlostních videozáznamů procesu rozprašování u tlakových vířivých trysek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto bakalárska práca je výsledkom mojej vlastnej práce vedenej doc. Ing. Jan Jedelským, Ph.D. a všetky použité zdroje sú uvedené v bibliografickom zázname.

Dátum: 21.4.2017

.....
Adam Červenec

Pod'akovanie

V prvom rade by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej práce doc. Ing. Janovi Jedelskému, PhD. za pomoc, motiváciu, trpezlivosť, keďže som s danou tematikou doteraz nemal žiadne skúsenosti a ochotu vylepšiť moje teoretické znalosti.

Chcel by som poďakovať aj doktorantovi Ing. Milanovi Malému, za uvedenie do problematiky a za veľkú pomoc s experimentálnym meraním, úpravou snímok a analýzou.

Zásluha patrí aj mojej priateľke, ktorá mi pomáhala s motiváciou, ale najmä s gramatickou a grafickou stránkou práce.

Práce vznikla za príspevní projektu GA15-09040S, který finančně podpořila Grantová agentura České republiky a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního príspevní Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I.”

Osnova

1. Úvod	10
2. Atomizér a geometria trysky	11
2.1 Tlaková vírivá tryska	11
2.2 Vývin a štádiá spreja	12
3. Deje v spreji	13
3.1 Pohyb kvapiek	13
3.2 Fázy spreja	13
3.3 Delenie kvapiek	14
3.4 Interakcie kvapiek a pozorované prostredie	15
3.5 Odraz kvapiek	18
4. Experiment a výbava	19
4.1 Kamera	20
4.2 Experiment	21
5. Analýza záznamov	23
5.1 Zrážka veľkej kvapky s malou	23
5.2 Zrážka kvapiek podobných rozmerov	24
5.3 Zrážka väčšej kvapky s menšou	26
5.4 Zrážka mimo záber	27
5.5 Výnimočné prípady zrážok	28
5.6 Zhrnutie vstupných parametrov	28
6. Štatistické vyhodnotenie	30
7. Záver	32
Zoznam použitej literatúry	34
Zoznam použitých symbolov skratiek	35
Zoznam príloh	36
Prílohy	37

1. Úvod

Proces vystrekovania kvapaliny z trysky je zložitým dejom dvojfázového disperzného prúdenia, pri ktorom dochádza k postupnému rozpadu objemu kvapaliny na čoraz menšie štruktúry a končí vznikom kvapiek rôznej veľkosti. Ich pohyb je ovplyvňovaný veľkým počtom faktorov, ako sú najmä okolité prostredie a interakcia jednotlivých kvapiek rôznych veľkostí s ostatnými. Tieto deje spolu tvoria výslednú štruktúru spreja. Práve rôzne veľkosti kvapiek zapríčiňujú výsledok zrážky, ktorý pozorujeme.

Na danú tématiku už existuje niekoľko článkov zaoberajúcich sa výsledkami zrážok kvapiek, ktoré sa ale líšia v niektorých aspektoch prevedenia experimentu. V mojom prípade pôjde o kvapalinu JET A-1, čo je skratka pre letecké palivo kerosín. Experiment prebehol za podmienok blízkyh realite, nebudeme pozorovať stret dvoch kvapiek v jednej ose, ale zanalyzujeme konkrétne oblasti spreja.

V tejto bakalárskej práci využívame jednu konkrétnu trysku, ktorej štruktúru spreja pozorujeme so špeciálnym vybavením. S využitím vysokorýchlostnej kamery Photron FASTCAM SA-Z zhotovujeme detailné zábery zrážok kvapiek a ostatných faktorov ovplyvňujúcich tvorbu spreja. Následne vytvorené záznamy vyhodnocujeme jednoduchým, ale zdĺhavým spôsobom kontroly jednotlivých snímok.

Na nasledujúcich stranách bude v skratke popísaný teoretický úvod obsahujúci rozbor základnej geometrie použitej trysky a typy sprejov, ktoré v závislosti na tlaku a tiež tvare trysky vznikajú. Následne predstavím hlavné komponenty použité počas experimentu a jeho samotný priebeh. Výsledok experimentu bolo spracovanie a fotogrammetrická analýza vybraných záznamov rozprašovania, popis a klasifikáciu kolízií medzi kvapkami.

2. Atomizér a geometria trysky

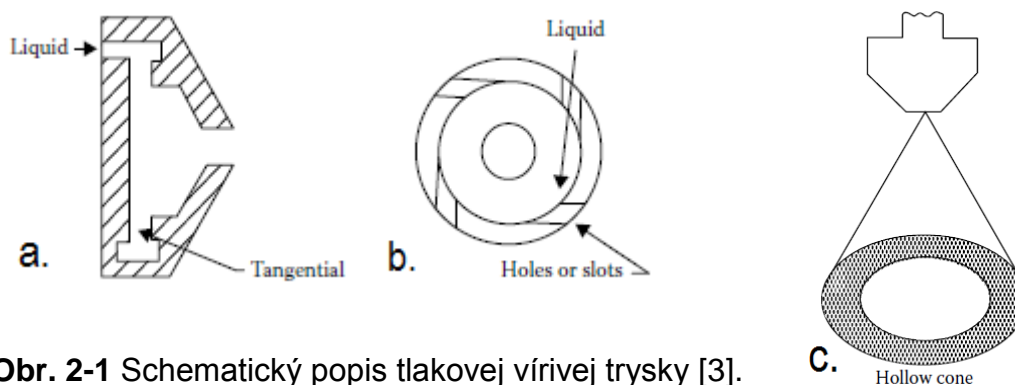
S atomizérmi sa môžeme stretnúť kdekoľvek v inžinierskej praxi. Nachádzajú sa najmä v komorách spaľovacích motorov, kde privádzajú palivo do komory, ale nájdeme ich aj v chladiacich zariadeniach a iných strojoch. Poznáme veľké množstvo druhov atomizérov, každý z nich má špecifický tvar, vlastnosti, a využíva iné princípy, s ktorými sú spojené výhody využiteľné v rôznych odvetviach.

Spreje, ktoré pomocou nich vznikajú, môžu byť vytvorené niekoľkými spôsobmi. Všetko, čo potrebujeme je vysoká relatívna rýchlosť medzi kvapalinou a okolitým vzduchom alebo iným plynom. Niektoré druhy atomizérov to dosiahnu tak, že žnú kvapalinu veľkou rýchlosťou do relatívne pomaly pohybujúceho sa prúdu ovzdušia. V našom prípade sa budeme zaoberať druhom tlakových vírivých trysiek. Ich hlavnou výhodou je jednoduchosť, vysoká efektivita, väčší uhol sprejov a možnosť úprav trysky podľa potrieb.

2.1 Tlaková vírivá tryska

Tlaková vírivá tryska je tvorená kruhovými výstupmi, ktorým predchádza vírivá komora, do ktorej prúdi kvapalina cez niekoľko tangenciálnych otvorov (obr. 2-1 b), alebo štrbín. Rozvírená kvapalina vytvára jadro vzduchu, ktoré sa rozprestiera od vypúšťacieho otvoru k zadnej časti komory. Kvapalina vystupuje z výtoku ako prstencovitý plášť, ktorý sa ťahá radiálne smerom nadol, aby vytvoril dutý, kužeľovitý sprej. Uhly sprejov sa pohybujú od 30° do takmer 180° , v závislosti od použitia. Atomizácia tlakovej vírvej trysky je všeobecne dobrá, závislá od dodaného tlaku a rozprašovacích uhlov. Na predstavu je jedna z možností stavby trysky zobrazená na obrázku 2-1.

Pre väčšinu aplikácií je preferovaný sprej vo forme plného kužeľa, ktorý sa skladá z kvapiek rozdelených pomerne rovnomerne po jeho objeme. Jeho hlavnou nevýhodou sú kvapky v centre spreja, ktoré sú väčšie, ako tie po okrajoch. Počas nášho experimentu budeme využívať sprej vo forme dutého kužeľa, v ktorom je väčšina kvapiek koncentrovaná na vonkajšom okraji kužeľovitého spreja. Viac informácií je poskytnutých v knihe [3].

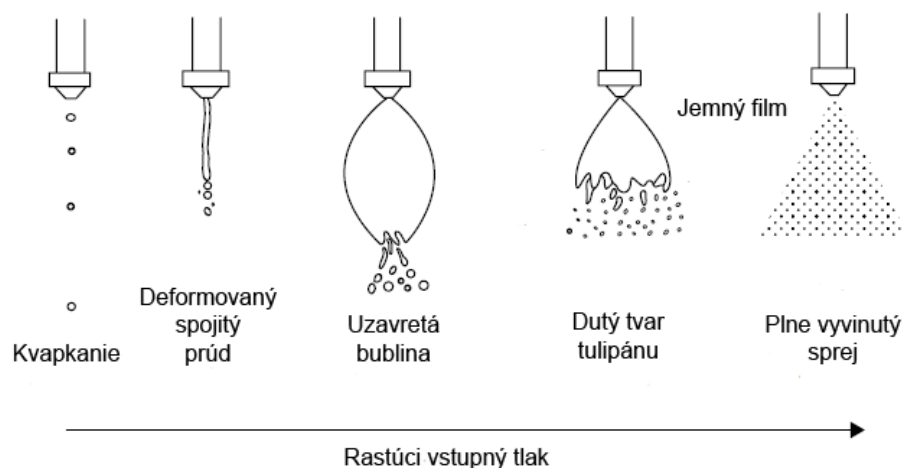


Obr. 2-1 Schematický popis tlakovej vírvej trysky [3].

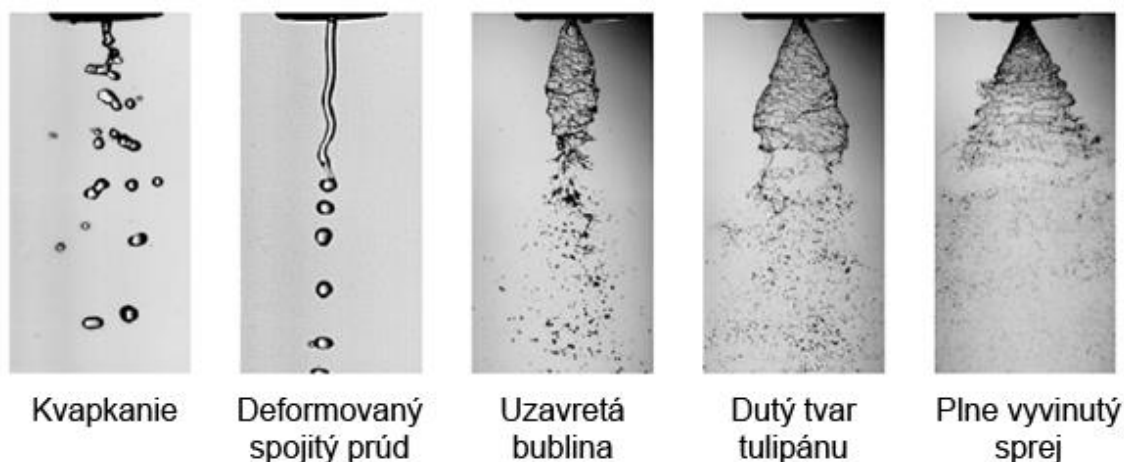
2.2 Vývin a štádia spreja

Vývin spreja, zobrazený na obrázkoch 2-2 a 2-3, prechádza niekoľkými fázami v závislosti na tlaku.

1. Kvapalina kvapká z otvoru. (0 MPa).
2. Kvapalina vyteká v podobe tenkého deformovaného spojitého prúdu, na ktorého konci sa formujú veľké kvapky. (0.01 MPa).
3. Kvapalný film sa vplyvom povrchového napätia formuje ako uzavretá bublina. (0.1 MPa).
4. Bublina sa otvára do dutého tvaru tulipánu, ktorý končí v ostrom okraji, kde sa kvapalina rozpadá na ešte pomerne veľké kvapky. (0.15 MPa).
5. Zakrivený povrch sa narovnáva do tvaru kužeľovitého plášťa. Ako sa plášť rozširuje, jeho hrúbka sa znižuje a pomaly sa stáva nestabilným, čo vedie k rozpadu na grupy kvapaliny a potom jednotlivé kvapky menších rozmerov, ktoré vytvárajú samotný sprej vo forme dutého kužeľa. (1 MPa+).



Obr. 2-2 Štádia vývinu spreja v závislosti na vzrastajúcom tlaku [3].



Obr. 2-3 Fotografie ilustrujúce vývin spreja tlakovej vírvej trysky [3].

3. Deje v spreji

Formovanie spreja sprevádza veľa dôležitých faktorov, ktoré danú štruktúru vytvárajú. Proces atomizácie je sprevádzaný premenou množstva kvapaliny na malé častice. V zásade to možno považovať za narušenie síl povrchového napätia pôsobením vnútorných a vonkajších síl. Pri absencii týchto síl má povrchové napätie tendenciu ťahať kvapalinu do tvare gule, ktorých tvar má minimálnu povrchovú energiu.

Aerodynamické sily pôsobiace proti povrchu kvapaliny taktiež prispievajú k jej narušeniu. K rozpadu dôjde vtedy, keď výsledná veľkosť rušivých síl prevýši hodnotu spájajúcej sily povrchového napätia, ktorá drží kvapalinu pohromade.

3.1 Pohyb kvapiek

Kvapky môžeme chápať ako malé častice, ktoré sa v čase pohybujú priestorom, zatiaľ čo na ne pôsobia rôzne vonkajšie vplyvy. Pohyb sa dá vyjadriť pomocou rovnice silovej rovnováhy častíc 3-1 [9]. Rovnica predpokladá trajektóriu častice, v závislosti na čase, integráciou silovej rovnováhy na časticu. Silová rovnováha sa rovná zotrvačnosti častice so silami na ňu pôsobiacimi (v smere osi x, v kartézskom súradnicovom systéme), je v tvare:

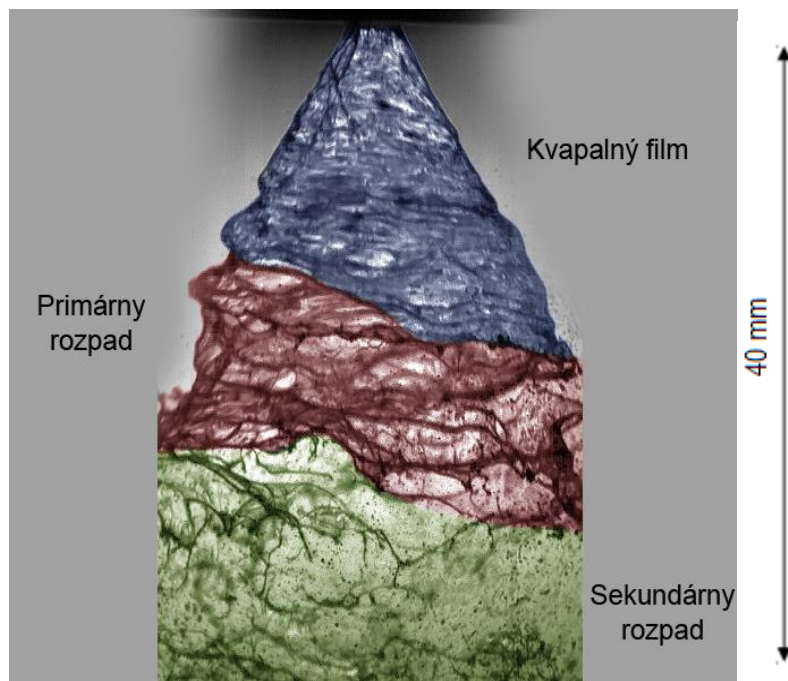
$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3-1)$$

Člen $F_D(u - u_p)$ popisuje účinok odporovej sily, ktorá predstavuje hlavný faktor vonkajších vplyvov na kvapku. F_x - dodatočné zrýchlenie vplyvom vonkajších síl vyvolaných magnetickým, elektromagnetickým poľom apod. $\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ reprezentuje Archimedov zákon vztlakových síl.

3.2 Fázy spreja

Pri takmer plne vyvinutom spreji, okolo 0,5 MPa, môžeme pozorovať jeho 3 hlavné štádia ilustrované na obrázku 3-2. Kvapalný film siaha do vzdialenosti približne od 0 až 4 milimetrov od trysky. Je tvorený kvapalinou ešte ako celkom a udržiava si svoj pôvodný tvar daný geometriou trysky. Vytvára uzavretý plášť, v ktorého vnútri nájdeme iba malé množstvo kvapiek. Ďalšou fázou je oblasť primárneho rozpadu, najčastejšie v rozmedzí 4 až 10 milimetrov, kde sa kvapalinový plášť začne pomaly trhať na zhluky, ktoré sú držané povrchovým napätím. Nakoniec sú tieto zhluky vplyvom, už vyššie spomínaných vonkajších síl, delené na väčšie a následne na menšie kvapky. Túto fázu nazývame

sekundárny rozpad, pre veľké množstvo interakcií. Pozorujeme v rozhraní 10 milimetrov až po koniec spreja.



Obr. 3-2 Kvapalný kužeľ a jeho fázy.

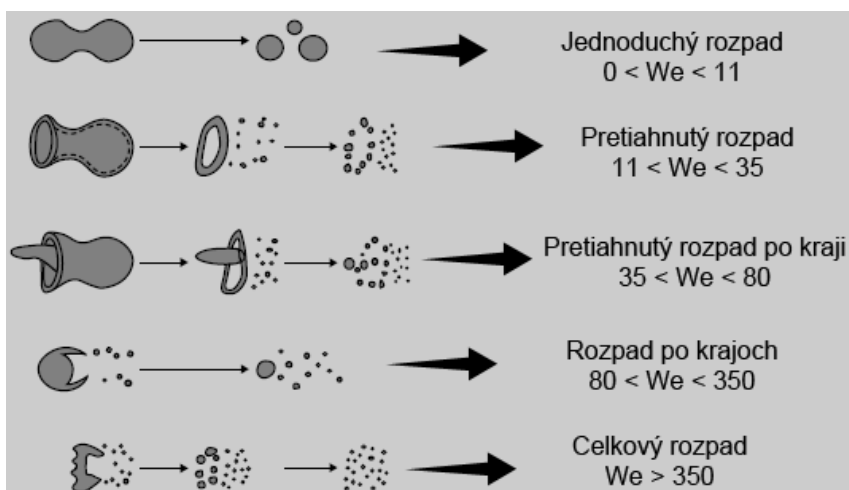
3.3 Delenie kvapiek

Práve vyššie spomínané deje sú predmetom nášho skúmania. Medzi tie najčastejšie patrí zrážka dvoch a ojedinele viacerých kvapiek rôznej veľkosti. Výsledok zrážky je ovplyvnený viacerými faktormi, ale práve ich rozmery sú jedným z hlavných parametrov, ktoré nám udávajú výsledok.

Súčasťou spreja je neustály proces delenia kvapiek, čo je dôsledkom pôsobenia odporových síl prostredia. Tieto sily sa postupom času zväčšujú, ako kvapka padá a rýchlosť kvapky rastie, je urýchľovaná tiažovým zrýchlením, tým pádom sa zvyšuje aj odpor vzduchu. V závislosti na prúdiacom režime, reprezentovanom Weberovým číslom (ďalej We), vzorec 3-2, môžu nastať rôzne druhy rozpadu samotnej kvapky. Práve delenie kvapiek je jedna z príčin prečo nie sú častice rovnakých rozmerov a môžu nastať interakcie kvapiek rôznych. Morfológiu rozpadu newtonskej kvapaliny vidíme na obrázku 3-3

$$We = \frac{\rho \cdot (v)^2 \cdot D}{\sigma} \quad (3-2)$$

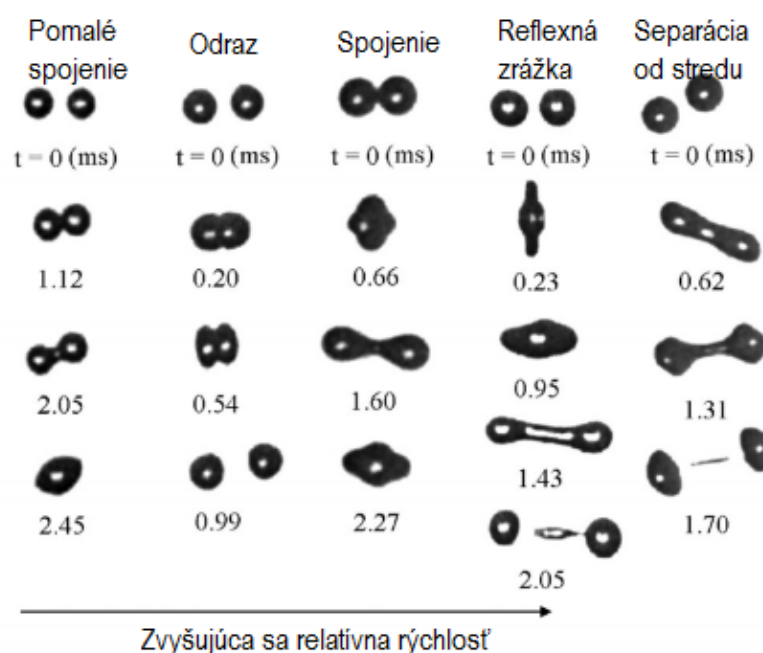
Zo vzorca môžeme poznať, že We rastie s kvadrátom rozdielu rýchlosti (v^2), ktorý teda priamo ovplyvňuje formu rozpadu kvapky. Hodnota We závisí aj od druhu kvapaliny, parametrami hustoty (ρ) a povrchového napätia (σ). Taktiež so zväčšujúcim sa priemerom kvapky (D) nastane rýchlejší rozpad.



Obr. 3-3 Morfológia rozpadu kvapky newtonskej kvapaliny [3].

3.4 Interakcie kvapiek a pozorované prostredie

Popri procesoch delenia a rozpadu kvapiek na menšie, dochádza taktiež k ich vzájomným interakciám, keďže je nimi priestor spreja veľmi prehustený. Pozorovaných môže byť niekoľko druhov zrážok, závislých na určitých parametroch, ktoré môžeme nazvať „vstupnými“. Jedným z hlavných sú rozmery samotných častíc, ktoré ovplyvňujú napríklad hmotnosť, hybnosť, tiažovú silu, kinetickú a potenciálnu energiu kvapiek. Veľmi dôležitou veličinou, ktorá úzko súvisí s hybnosťou, je rýchlosť, ktorá nám taktiež priamo ovplyvňuje výsledok zrážky.

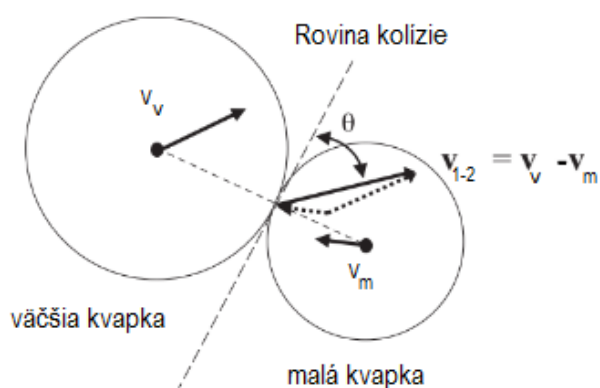


Obr. 3-4 Druhy kolízií kvapiek a ich priebeh [2].

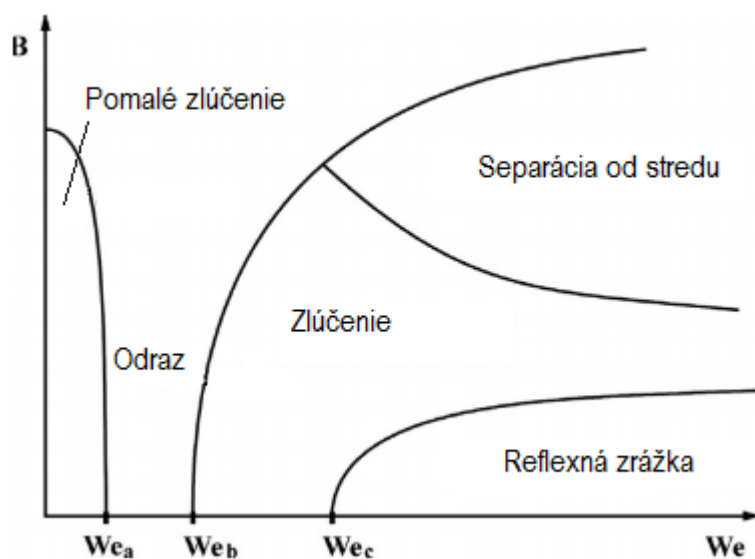
Vzhľadom na tieto súvislosti možno usúdiť, že nastanú rôzne typy zrážok kvapiek, v závislosti na spomenutých vstupných parametroch. Tieto súvislosti popisuje rovnica kolízneho Weberovho čísla (3-3), ktorá na rozdiel od rovnice prúdiaceho režimu využíva priemer menšej kvapky (D_m), hustotu kvapiek (ρ), povrchové napätie (σ) a kvadrát relatívnej rýchlosti kvapiek (v_v – rýchlosť väčšej; v_m – rýchlosť menšej).

$$We_{1-2} = \frac{\rho_k \cdot (v_v - v_m)^2 \cdot D_m}{\sigma} \quad (3-3)$$

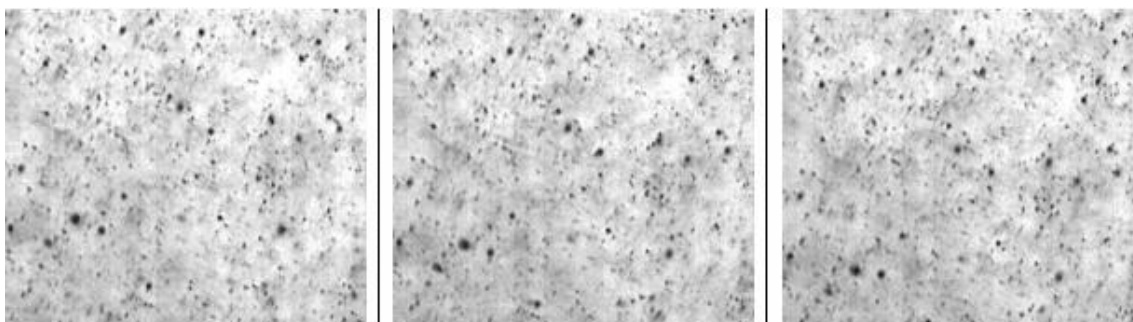
Keďže sa kvapky nepohybujú len po jednej ose, nemusí dôjsť iba k prípadu čelnému stretu častíc. Ak nenastane priama zrážka, druhým najdôležitejším parametrom sa stáva uhol dopadu (θ). Príklad zrážky je zobrazený na obr. 3-5.



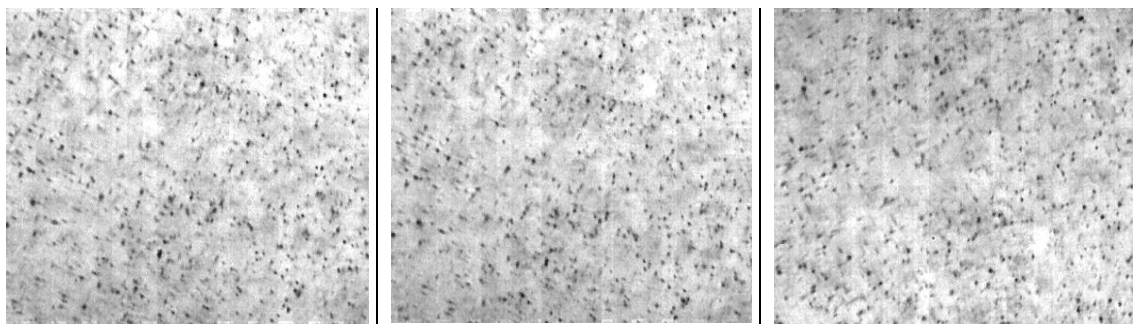
Obr. 3-5 Príklad kolízie dvoch kvapiek rôznych rýchlostí a veľkostí [2].



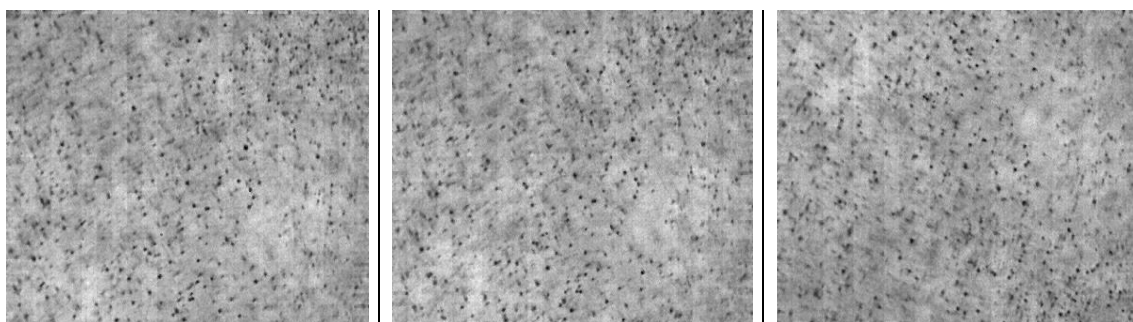
Obr. 3-6 Vplyv kolízneho Weberovho čísla a uhlu dopadu na výsledku zrážky [5].



Obr. 3-7 Vstupný tlak $p = 0,5$ MPa ; poloha: $z = 25$ mm $y = 0$ mm; doba medzi snímkami $1\mu s$.



Obr. 3-8 Vstupný tlak $p = 1$ MPa ; poloha: $z = 25$ mm $y = 0$ mm ; doba medzi snímkami $1\mu s$.



Obr. 3-9 Vstupný tlak $p = 1,5$ MPa ; poloha: $z = 25$ mm $y = 0$ mm; doba medzi snímkami $1\mu s$.

Na predchádzajúcej sérii snímok sú zobrazené príklady sledovaných oblastí s rozmermi 1.7×1.5 mm (384×336 px) hĺbkou ostrosti 0.5 mm. S rastúcim tlakom pozorujeme zvyšujúce sa zahustenie priestoru kvapkami, čo vedie k predpokladanej väčšej frekvencii interakcií.

Jednou z ďalších vecí, ktoré si možno všimnúť, sú veľkosti kvapiek. Medzi sériami snímok sa mení iba vstupný tlak, ktorým je sprej tvorený. Z toho vyplýva, že samotné veľkosti častíc sú daným vstupným tlakom priamo ovplyvnené. S rastúcim tlakom sa teda znižuje priemer kvapiek, pretože na kvapky letiace vyššou rýchlosťou pôsobí väčšia odporová sila, ktorá vedie k triešteniu na menšie kvapky.

3.5 Odraz kvapiek

Taktiež sa pri analýze môžeme stretnúť s prípadom pružného odrazu kvapiek, ktorý nastáva prevažne v spodnej časti spreja, presnejšie v oblasti sekundárneho rozpadu. Kvapky nemajú dostatočnú kinetickú energiu a hmotnosť na to, aby spôsobili výraznejšiu deformáciu. Pre pozorovanie tieto prípady nemajú veľký význam, keďže priestor je veľmi prehustený malinkými čiastočkami a jeho presnejšia analýza je takmer nemožná. Výsledky by boli veľmi nepresné.

4. Experiment a výbava

Na vykonanie experimentu je potrebná špecifická výbava prístrojov. Toto špeciálne vybavenie nám poskytlo laboratórium sprejov (obr.4-1) pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského, Ph.D.



Obr. 4-1 Vybavenie v laboratóriu sprejov [7].

Hlavnou súčasťou je samotná tryska, ktorá bude predmetom skúmania. V našom prípade ide o tlakové vírivé trysky T-16 a T175 využívané v chladiacích zariadeniach, motoroch a podobne. Kvapalinu vytekajúcu z trysky predstavuje kerosin tab.4-1. V súčasnosti je používaný najmä ako letecké palivo. Na uchytenie prístrojov nám poslužil laboratórny rám s posuvným 3D traverzovacím zariadením, pomocou ktorého sme manipulovali s tryskou v priestore. Do trysky bola kvapalina privádzaná pomocou čerpadla. Podstatnou súčasťou merania je osvetlenie, bez ktorého na snímkach vidíme iba tmavé, slabo viditeľné častice na čiernom pozadí. Použili sme LED reflektor postavený priamo oproti kamere, ktorý pomohol zvýšiť viditeľnosť objektov na videu. Ani využitie výkonného reflektora nebolo dostačujúce na vytvorenie záznamov, vhodných na analýzu, ale následnými úpravami v príslušných programoch, ako napríklad MatLab, alebo Adobe Photoshop, vieme objekty na snímkach dostatočne zviditeľniť. Detailný popis sústavy zariadení potrebných na meranie je popísaný v diplomovej práci Ing. Milana Malého [4].

Tab. 4-1 – Fyzikálne údaje kerosinu pre teplotu $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlak $p = 100\text{ kPa}$.

Hustota	795 [kg/m ³]
Dynamická viskozita	1.9 [MPa.s]
Povrchové napätie	0.029 [kg/s ²]

4.1 Kamera

Najpodstatnejšou súčasťou laboratória je vysokorýchlostná kamera Photron FASTCAM SA-Z, vid'. obrázok 4-2, ktorá predstavuje najvýkonnejšiu kameru v Českej republike. Je schopná vytvárať záznamy v režime až 2 miliónov snímok za sekundu, ale takýto mód pri našom pozorovaní, vzhľadom na rozlíšenie, využiť nemôžeme a ani nám nebude potrebný.

Kamera dokáže na svoj úložný priestor krátkodobo nahráť niekoľko v ráde až 10 000 záberov a následne v príslušnom softvéri možno fotky jednoducho podľa potrieb upraviť a ihneď zálohovať na zvolený disk, alebo iný úložný priestor.

Výhody a nevýhody využitia kamery pri našom pozorovaní:

Výhody:

- precízna a detailná analýza jednotlivých dejov v spreji
- vytvorený obraz môže byť spustený v spomalenom spätnom režime
- nastaviteľná frekvencia vytvárania snímok (v našom prípade okolo 200,000 snímok za sekundu)
- jednoduchá manipulácia

Nevýhody:

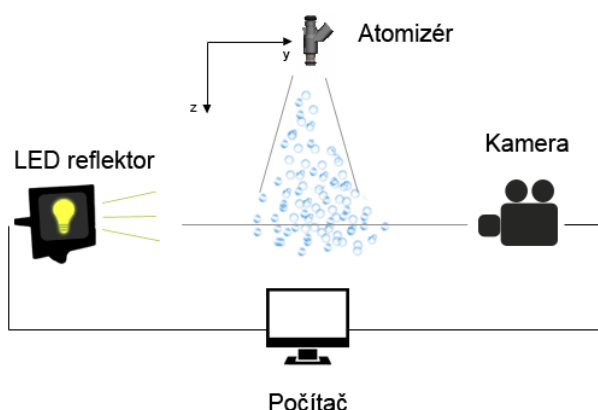
- potrebné silné osvetlenie
- nutná úprava snímok



Obr. 4-2 Vysokorýchlostná kamera Photron FASTCAM SA-Z [6]

4.2 Experiment

Samotný experiment spočíval vo vytvorení makro-záznamov, ktoré budú následne použité na analýzu pohybu a interakcií kvapiek. Po nastavení všetkých potrebných prístrojov sme spustili kameru a prebehlo nahrávanie záznamov v režimoch tlakov 0,5, 1 a 1,5 MPa. Jednoduchá schéma vzájomného postavenia prístrojov je znázornená na obr. 4-3.



Obr. 4-3 Schéma vzájomného rozostavenia hlavných zariadení.

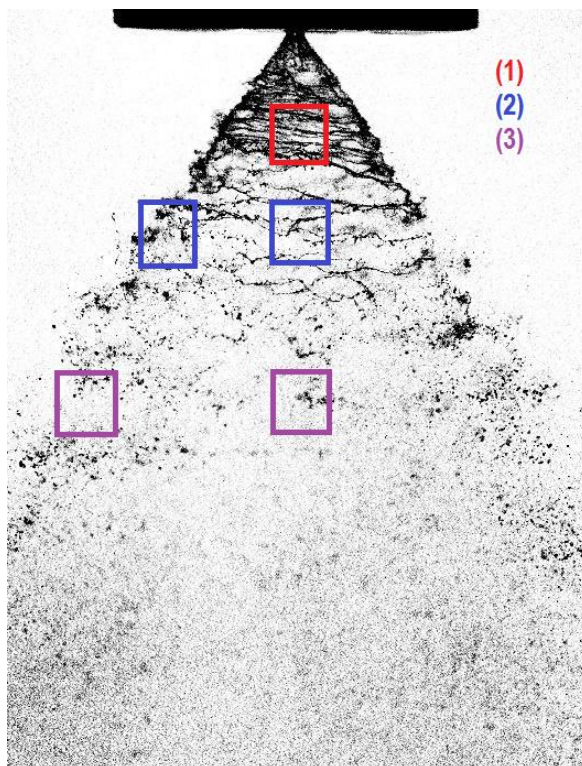
Pomocou posuvného zariadenia, na ktoré bola tryska upevnená, sme volili rôzne polia spreja. Boli zamerané 3 hlavné zóny kvapalného kužeľa. Oblasť kvapalného filmu vo zvislej vzdialenosti (os z) 12,5 milimetra od vrcholu trysky (obr. 4-4 1).

V oblasti primárneho rozpadu, vzdialeného približne 25 milimetrov od vrcholu trysky, nás zaujímajú najmä zrážky a rozpad kvapalného filmu na kvapky väčších rozmerov. V tejto oblasti je kužeľ spreja už značne vyvinutý vo vodorovnej osi (smer y), preto by sme mali sledovať správanie kužeľa aj na jeho okrajoch (obr. 4-4 2).

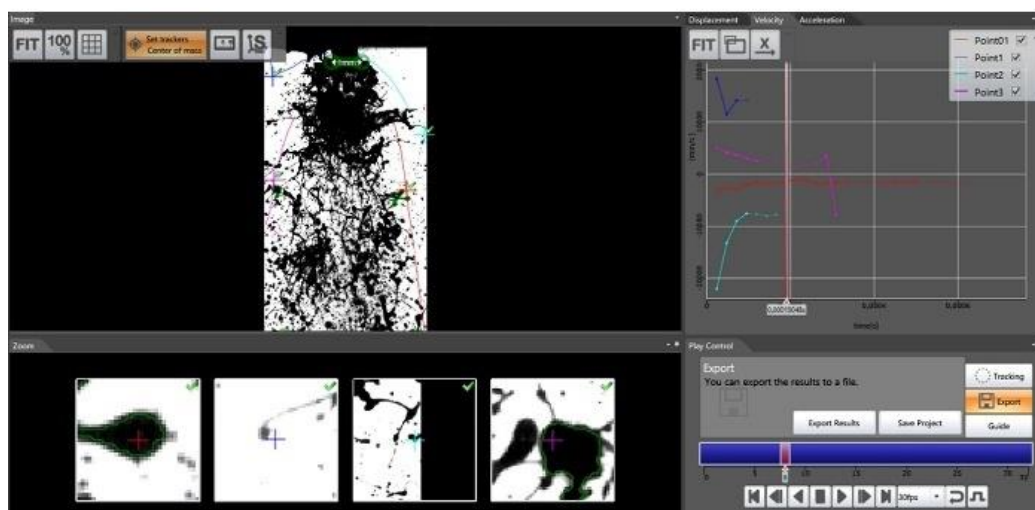
Oblasť sekundárneho rozpadu približne vo vzdialenosti 50 milimetrov od vrcholu trysky je preplnená malými kvapkami, ktoré sa pri zrážke od seba odrazia a zložitejšie interakcie sú menej pravdepodobné, ako v predošlých oblastiach. Taktiež je vhodné pozorovať meniace sa správanie spreja vo vodorovnej osi (obr. 4-4 3).

Samotná kamera ponúka vlastný softvér s jednoduchým užívateľským prostredím obr. 4-5, pre úpravu záznamu a nastavenie parametrov nahrávania, ako sú napríklad rozlíšenie videa, doba medzi vytvorenými snímkami, jas, kontrast a podobne. Po zhotovení záznamov prebehla analýza vytvoreného filmu. Kamera vytvorila súbor s rozsahom niekoľko desiatok tisíc snímok. Keďže časom nedochádza k žiadnej zmene prostredia, tlaku ani iných faktorov, na analýzu stačilo použiť určité percento záznamov. Analýza spočívala v sledovaní jednotlivých snímok a v pozorovaní pre nás podstatných udalostí, ako sú

interakcie kvapiek, prostredie ovplyvňujúce správanie kvapalného kužeľa a pohyb kvapiek.



Obr. 4-4 Kvapalný kužeľ s približnými polohami pozorovaných oblastí [4].



Obr. 4-5 Uživatelské prostredie vstavaného programu kamery Photron FASTCAM SA-Z. [8]

5. Analýza záznamov

Po uskutočnení experimentu pre režimy vstupných tlakov 5, 10 a 15 MPa, prebehla analýza vytvorených makro-záznamov, ktorá pozostávala z detailného prehliadania každej jednej snímky z vybranej vzorky filmu vytvoreného vysokorýchlostnou kamerou. Pred samotnou analýzou bolo potrebné ešte snímky upraviť, pretože sa kvapky napriek použitému osvetleniu naďalej javili ako čierne bodky na tmavom pozadí. Za pomocou programov, ako je napríklad MatLab R2015b a Adobe Photoshop, bol na fotkách zvýšený jas o približne 70% a kontrast v rozmedzí od 90 do 110%. Následne boli vyhľadávané zaujímavé udalosti spomenuté v podkapitole 4-3.

V závislosti na tvare a fáze kužeľa boli volené rôzne miesta, pomocou posuvného zariadenia pripojeného na trysku, vo zvislej a vodorovnej ose. Oblasti sa mali podľa predpokladu výrazne líšiť počtom interakcií a správaním kvapiek, pretože boli ovplyvňované rôznymi faktormi, akými sú prehustený priestor, vírenie vzduchu, povrchové napätie zhlukov kvapaliny, povrchovým napätím samotných kvapiek a zotrvačnými silami.

Teoreticky sme predpokladali, že môže nastať niekoľko typov zrážok v závislosti na vzájomnej veľkosti kvapiek, ktoré sme si rozdelili do niekoľkých kategórií v tab. 5-1.

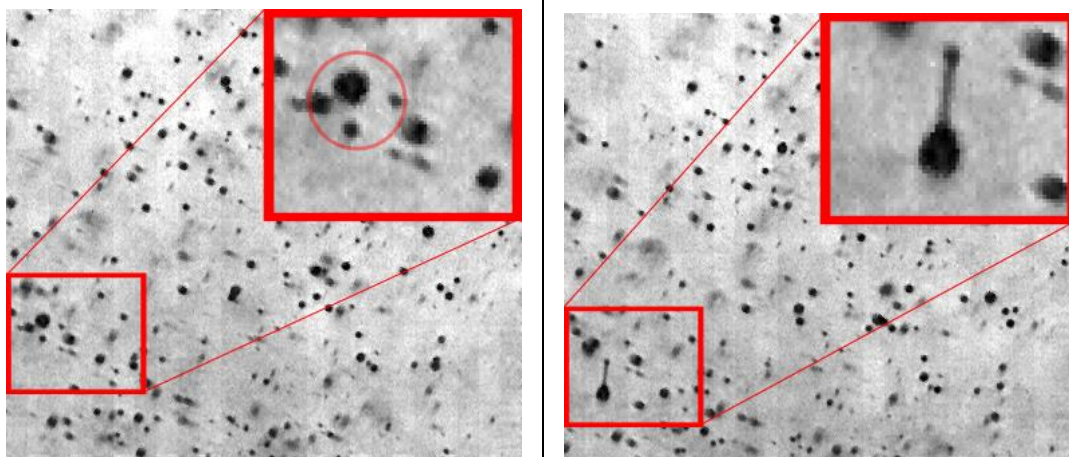
Tab. 5-1 Kategórie typov zrážok v závislosti na veľkosti, kde D predstavuje priemer kvapiek.

Kategória	Veľkosti [-]
#1 Zrážka veľkej kvapky s malou	$D_1 \gg D_2$
#2 Zrážka kvapiek podobných rozmerov	$D_1 = D_2$
#3 Zrážka väčšej kvapky s menšou	$D_1 > D_2$
#4 Zrážka mimo záber	$D_1 \gg D_2$; $D_1 > D_2$; $D_1 = D_2$

Analýzou boli všetky jednotlivé pozorované zrážky roztriedené podľa vzájomného pomeru rozmerov kvapiek do týchto 4 kategórií. Pre predstavu bol priebeh každého druhu kolízie detailne popísaný a spracovaný v nasledujúcich podkapitolách. Zorné pole predstavuje rámček s rozmermi 1.7 x 1.5 mm (384 x 336 px, šírka x výška) s hĺbkou ostrosti približne 0.5 mm.

5.1 Zrážka veľkej kvapky s malou

Zrážka veľkej kvapky s malou môže byť definovaná ako kolízia dvoch kvapiek, kde je priemer jednej z nich niekoľkonásobne väčší od priemeru menšej. Z teoretických predpokladov možno uznať, že kvapka s výraznejším priemerom bude mať väčší objem, a tým aj hmotnosť. Z pohybovej rovnice vychádza, že hmotnejšia kvapka urýchľovaná tiažovým zrýchlením nadobudne vyššiu rýchlosť, zatiaľ čo menšia kvapka brzdená odporovou silou prostredia bude dosiahnutá väčšou a nastane kolízia obr. 5-1.



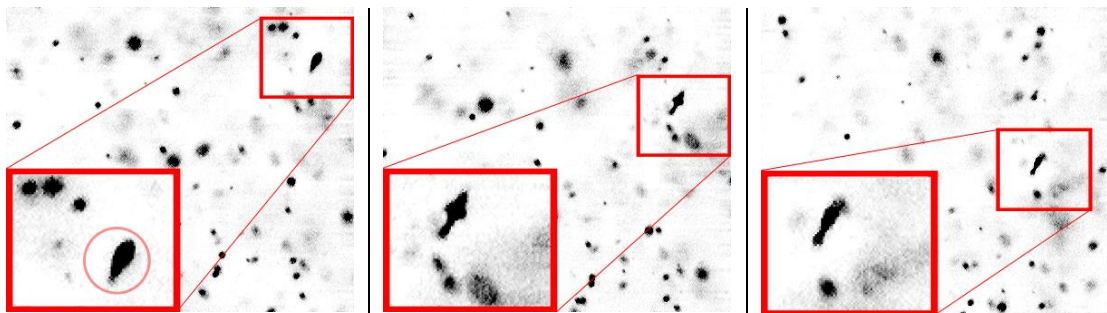
Obr. 5-1 Priebeh zrážky veľkej kvapky s malou. #1/1

Na obrázku 5-1 bol viditeľný typický príklad kolízie veľkej kvapky s malou. Zrážka bola pozorovaná pri vstupnom tlaku 0,5 MPa vo zvislej vzdialenosti 50 milimetrov od vrcholu trysky a nulovom vychýlení vo vodorovnej osi, teda v oblasti sekundárneho rozpadu. V tejto zóne sa kvôli tvaru a pokročilému vyvinutiu kvapalinového kužela častice pohybujú priestorom v rôznych smeroch. Došlo ku priamej zrážke, čo je pre túto zónu výnimočná situácia.

Pre tento prípad sa výrazne prejavuje vplyv veľkých rozdielov rýchlostí. Väčšia kvapka sa voči menšej pohybovala 6,9-krát rýchlejšie. Mohutnejšia kvapka pohybujúca sa vysokou rýchlosťou dobehne niekoľkonásobne menšiu kvapku a nastane stret. Na druhom obrázku zo série môžeme pozorovať, že veľkosť častíc sa takmer nezmenila, došlo iba k vytvoreniu spojenia vo forme dlhého mostíka, ktorý medzi kvapkami vznikne v dôsledku pôsobenia povrchového napätia. Keďže väčšia kvapka má dostatočne vysokú kinetickú energiu, dôjde k jeho pretrhnutiu a vytvoreniu nových malých kvapôčiek.

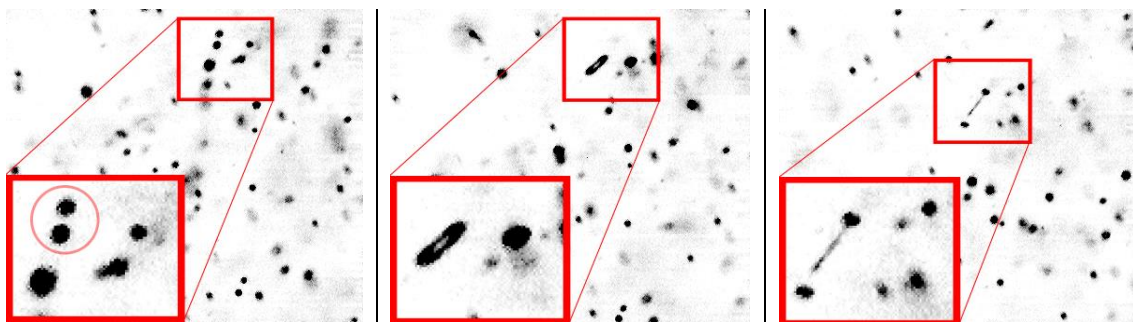
5.2 Zrážka kvapiek podobných rozmerov

Ďalším pozorovaným prípadom je interakcia podobne veľkých kvapiek, čo znamená, že priemer obidvoch kvapiek sa nijako výrazne nelíši. Hlavnou príčinou v rozdieloch výsledkov zrážok je relatívna rýchlosť medzi časticami. Z podobných veľkostí vyplýva, že vonkajšie sily pôsobiace na obidve kvapky budú približne rovnaké. Bolo pozorovaných niekoľko druhov zrážok s odlišným priebehom, ktoré sú zobrazené na nasledujúcich obrázkoch v tejto podkapitole.



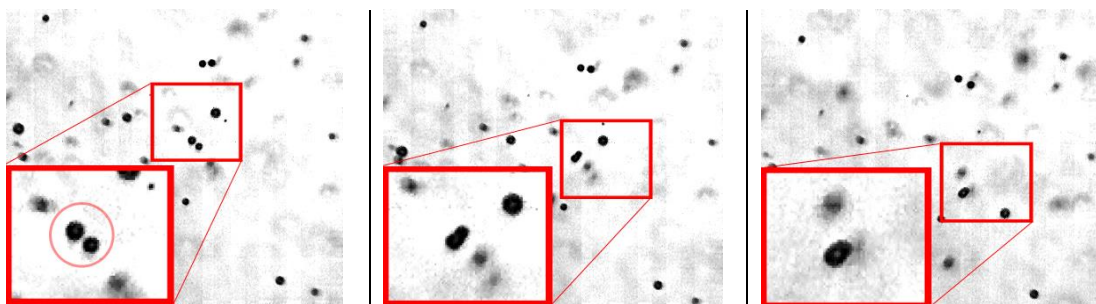
Obr. 5-2 Priebeh zrážky podobne veľkých kvapiek so spojeným mostíkom. #2/1

Obrázok 5-2 zobrazuje interakciu kvapiek s podobným priemerom **so spojeným mostíkom**. Ku zrážke došlo v oblasti sekundárneho rozpadu vo vzdialenosti 50 milimetrov od vrcholu trysky pri tlaku 1,5 MPa. Podobne ako v predchádzajúcom prípade došlo k priamej kolízii. Vznikne spojenie medzi kvapkami vo forme mostíka. Podobné veľkosti a relatívne rýchlosti kvapiek zapríčinili, že ani jedna z častíc nemala dostatočnú energiu na to, aby prekonala silu povrchového napätia a odtrhla sa od vzniknutého mostíka. Dôkazom tejto teórie je kvapka, ktorá sa posúvala po mostíku, ako náhle dosiahne jeho vrchol, sily od povrchového napätia ju pritiahnu nazad. Tento proces prebieha, dokým sa energia sústavy nevyrovná a vznikne nová veľká kvapka zložená z dvoch pôvodných.



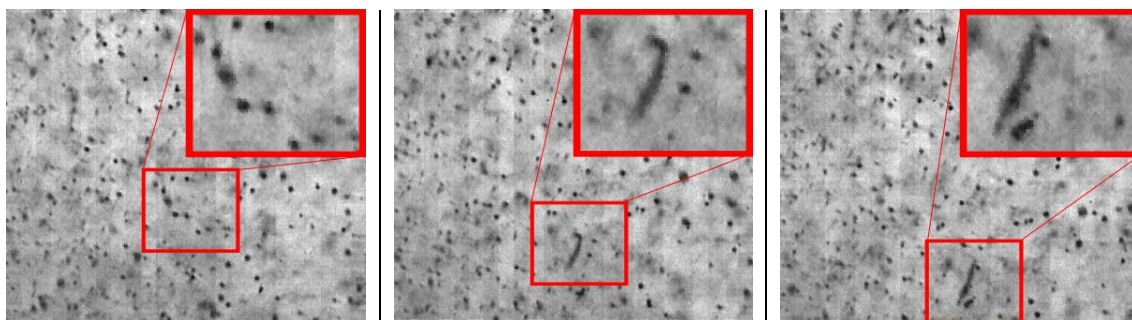
Obr. 5-3 Priebeh zrážky podobne veľkých kvapiek s vyššou relatívnou rýchlosťou. #2/2

Obrázok 5-3 zobrazuje podobný prípad zrážky podobne veľkých kvapiek **s vyššou relatívnou rýchlosťou**. Situácia nastala pri vstupnom tlaku 1,5 MPa, vo vzdialenosti 50 milimetrov od vrcholu trysky. Rozdiel oproti predchádzajúcemu druhu je vo vysokej relatívnej rýchlosti, ktorá po náraze spôsobí natiahnutie jednej z kvapiek a vytvorenie krátkodobého mostíka. Vplyvom zotrvačných síl následne dôjde k narušeniu spojenia, po ktorom pozorujeme niekoľko samostatných, novo vzniknutých zhlukov kvapaliny. Tento prípad má vo výsledku určité podobnosti so zrážkou veľkej kvapky s malou, pretože relatívna rýchlosť vrážajúcej častice je niekoľkonásobne vyššia. Napriek tomu podobné rozmery zapríčia, že ani jedna z nich nie je dominantná svojou veľkosťou a taktiež nedôjde k rozpadu v dôsledku zrážky.



Obr. 5-4 Priebeh zrážky podobne veľkých kvapiek pod uhlom. #2/3

Môže nastať aj prípad kedy nedôjde k priamemu stretu. Takýto druh zrážky, ku ktorému došlo v oblasti sekundárneho rozpadu vzdialenosti 50 milimetrov od vrcholu trysky a vo vodorovnej osi blízko kraja kužela, je zobrazený na obrázku 5-4. Rýchlejšia kvapka vrazí do druhej **pod uhlom**, čo vedie k spojeniu a následnej spoločnej rotácii. Nameraná rýchlosť prvej kvapky je len 3,2-krát vyššia, takže rozdiel kinetických energií nie je dostatočný na to, aby došlo k vytvoreniu mostíka. Dôjde len k jednoduchému krátkemu spojeniu a energia zrážky sa rozptýli rotáciou. Po ustálení sa čiastočky spoja dohromady a výsledkom tejto kolízie jedna veľká kvapka.



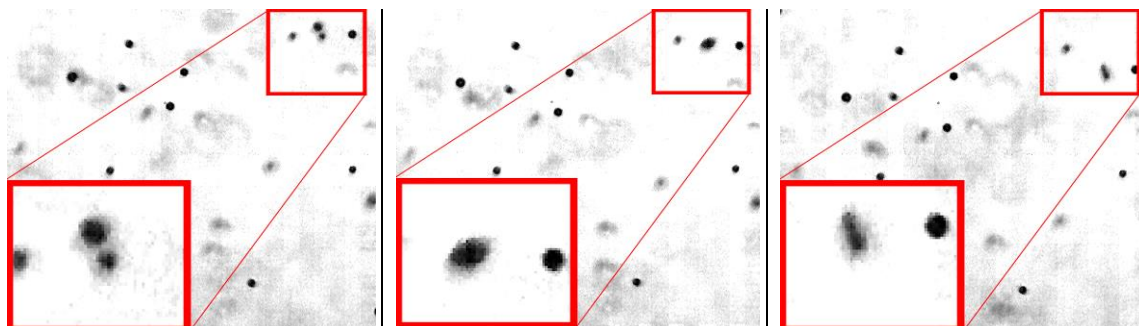
Obr. 5-5 Priebeh zrážky podobne veľkých kvapiek s výsledkom rozpadu. #2/4

Pozorovaný bol aj prípad stretu dvoch kvapiek s podobnými rozmermi, ktorého výsledkom bol **rozpad** (obr. 5-5) na zhluk kvapaliny. Predpokladáme, že aby došlo k rozpadu kvapiek, musí sa jedna z nich pohybovať relatívne oproti druhej veľmi veľkou rýchlosťou a svojou kinetickou energiou sa „rozbije“ o takmer stojacu kvapku, do ktorej narazí. Tento dej bol pozorovaný v oblasti primárneho rozpadu s menšou výchylkou v osi y. Aby mala kvapka potrebnú rýchlosť, musí ju niečo do tohto stavu uviesť, preto bol vstupný tlak na hodnote 1,5 MPa. Pokiaľ nenastane ďalšia zrážka, predpokladáme, že by sa mal zhluk kvapaliny následne sformovať vplyvom povrchového napätia do pôvodného kvapčkovitého tvaru.

5.3 Zrážka väčšej kvapky s menšou

Často nastali situácie, kedy nebolo jasné, do ktorej kategórie daná zrážka patrí, pretože bola na rozhraní prvej a druhej kategórie. Preto bola vytvorená skupina kolízie väčšej kvapky s menšou, kde priemer jednej z kolidujúcich častíc bol približne oproti druhej aspoň 1,5-krát väčší. Táto kategória, ktorej význam je

hlavne štatistický, je zmesou dvoch predchádzajúcich, preto sme nepozorovali žiadne nové druhy zrážok.

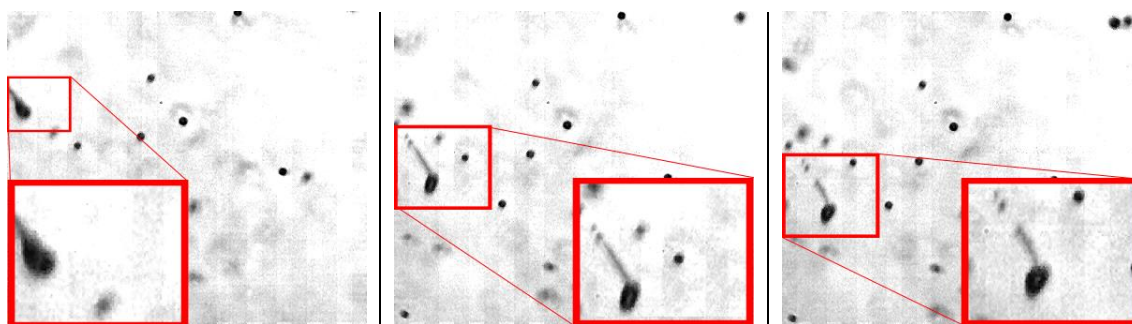


Obr. 5-6 Priebeh zrážky väčšej kvapky s menšou. #3/1

Na obrázku 5-6 je typický predstaviteľ zrážky, pre ktorú sme nevedeli vybrať vhodnú kategóriu, pretože bola na rozhraní prvých dvoch. Ide o už spomínanú kolíziu, ktorá vedie k vytvoreniu krátkeho mostíka, po ktorom sa posúva jedna z kvapiek a vyrovnáva svoju jemne zvýšenú energiu. Môžeme pozorovať, že ide o zmes krátkeho spojenia a tvorby mostíka.

5.4 Zrážka mimo záber

Veľká časť zrážok nastala mimo zorné pole. Pozorovať sme teda mohli iba ich výsledky, nedokázali sme určiť pôvodne rozmery kvapiek a ani ich počiatočné rýchlosti. Význam tejto skupiny je taktiež hlavne štatistický a občas sme pozorovali výnimočné prípady ako sú niekoľkonásobné zrážky a rozpady, ktoré nás zaujali.

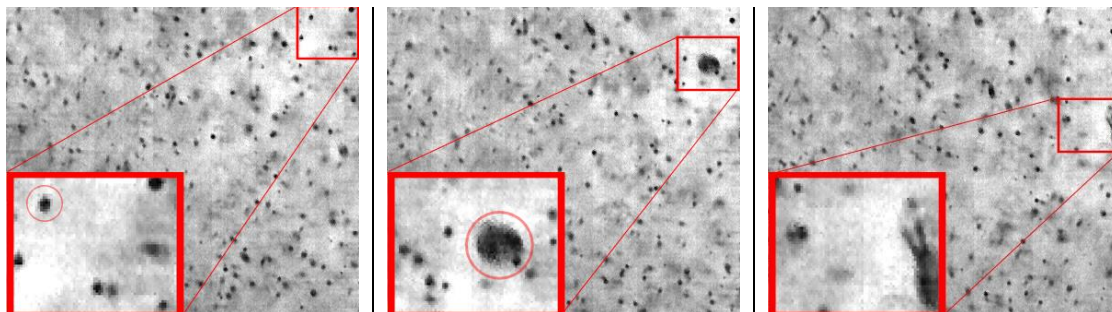


Obr. 5-7 Zrážka mimo zorné pole. #4/1

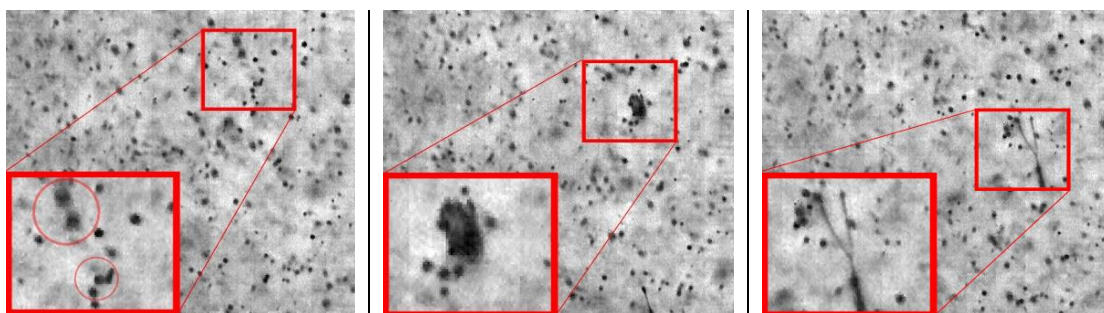
Typická zrážka mimo záber je zobrazená na obrázku 5-7. Kolízia nastala niekde v oblasti tesne pred pozorovaným rámčekom. Z výsledku zrážky si môžeme iba tipnúť, že nastala interakcia väčšej kvapky s menšou. Taktiež sa dá predpokladať veľký rozdiel v relatívnej rýchlosti, keďže došlo k vytrhnutiu kvapaliny a vytvoreniu niekoľkých sekundárnych kvapôčiek a zhlukov. Takýto záver, ale nemá žiadny širší význam, pretože ide iba o dohady.

5.5 Výnimočné prípady zrážok

Počas analýzy sme pozorovali ojedinelé prípady niekoľkonásobných zrážok. Napriek tomu, že sa priestor zdá kvapkami prehustený, je v skutočnosti najmä v spodnej časti spreja pomerne prázdny. Výskyt tohto výnimočného prípadu preto predpokladáme vo fáze kvapalného filmu spreja, kde sa stretávajú kvapky so zhlukmi kvapaliny, ktoré sú ťažko pozorovateľné. Skúmanie prebehlo najmä v štádiu primárneho a sekundárneho rozpadu, kde považujeme dvojité a trojité kolízie za veľmi málo pravdepodobné.



Obr. 5-8 Priebeh dvojitej zrážky. #5/1



Obr. 5-9 Priebeh trojitej zrážky. #5/2

Ojedinelý prípad viacnásobných kolízií je zobrazený na obrázkoch 5-8 a 5-9. Obidve boli pozorované pri vstupnom tlaku 15 MPa v predpokladanej oblasti primárneho rozpadu. Veľká kvapka s vysokou kinetickou energiou vrazila do menších a vytvorila zrážku, ktorá sa javila ako rozpad. Napriek tomu pôsobenie povrchového napätia sformovalo kvapky do pôvodného tvaru a nastalo natiahnutie vo forme dlhého dvojitého mostíka a následnému pretrhnutiu, čo viedlo k vytvoreniu zhlukov kvapaliny z pôvodných kvapiek. V druhom prípade došlo pred pretrhnutím k tretej zrážke.

5.6 Zhrnutie vstupných parametrov

Pri pokročilej analýze bolo zistené, že sa vstupné parametre a jednotlivé zrážky opakujú v závislosti na určitých podmienkach, ktoré sme nazvali vstupnými. Typy interakcií sme teda mohli predpokladať vzhľadom na veľkosť a rýchlosť kvapiek ešte pred kolíziou. Parametre pre vyššie spomenuté prípady boli zhrnuté do tabuľky 5-2, kde V_1 a v_1 predstavuje, pre každý prípad, časticu s väčším priemerom, resp. s vyššou rýchlosťou.

Číslo zrážky	Pomer veľkostí	Pomer rýchlostí
#1/1	$V_1 = 9,0$ násobok V_2	$v_1 = 5,5$ násobok v_2
#2/1	$V_1 = V_2$	$v_1 = 5,0$ násobok v_2
#2/2	$V_1 = 1,2$ násobok V_2	$v_1 = 6,4$ násobok v_2
#2/3	$V_1 = 1,2$ násobok V_2	$v_1 = 5,1$ násobok v_2
#2/4	$V_1 = 1,4$ násobok V_2	$v_1 = 6,9$ násobok v_2
#3/1	$V_1 = 3,6$ násobok V_2	$v_1 = 4,9$ násobok v_2

Tab. 5-2 Vstupné parametre pre jednotlivé zrážky.

Výsledok zrážky je závislý na vzájomnej veľkosti rýchlosti a objemoch, preto sú čísla prevedené na relatívne hodnoty. Rozmery kvapiek boli namerané pomocou prevodu zväčšenia a počtu pixelov, ktoré obrys kvapky obsahoval, na reálnu veľkosť. Rýchlosť sme vyčíslili pomocou vektorov posunutia za dobu medzi snímkami, taktiež prevodom pixelov na metre.

6. Štatistické vyhodnotenie

Predmetom tejto práce bolo aj štatistické vyhodnotenie všetkých nameraných vzoriek. Experimentálne sme namerali 9 oblastí spreja, každá z nich pre režimy tlakov 0,5, 1 a 1,5 MPa. Priebeh analýzy je spomenutý v kapitole 5. Aby sme dokázali potvrdiť už existujúce teórie a popísať deje v jednotlivých fázach spreja, muselo prebehnúť dôkladné vyhodnotenie pre všetky zvolené snímky činiac okolo 40 000 fotografií, ktoré boli rozdelené do 4 predurčených kategórií. Zo vzniknutých výsledkov sme zostavili špecifické tabuľky (príloha 1) . Jeden z príkladov je zobrazený v tabuľke 6-1. Prvý riadok predstavuje parametre merania, kde p reprezentuje vstupný tlak. Z a Y sú veľkosti výchylky v osiach. Kamera niesla nastavenie 120 000 snímok za sekundu (120K) a vyhodnotená bola zakaždým vzorka o veľkosti 2000 fotiek (2K snímok). Nakoniec bola vyčíslená frekvencia interakcií v zornom poli, ktorá predstavuje počet kolízií za sekundu. Posledný stĺpec určuje dobu medzi jednotlivými snímkami.

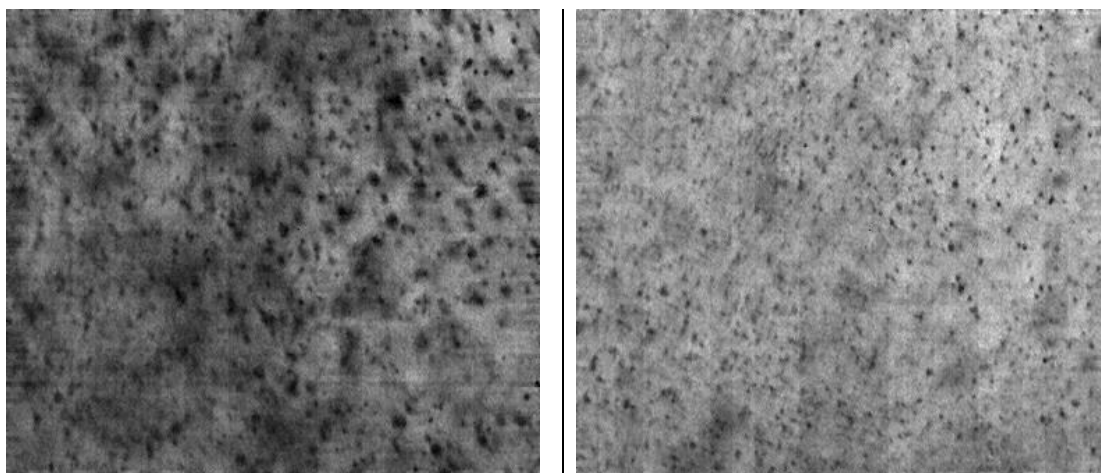
Tab. 6-1 Príklad jednej z tabuliek počtu interakcií pre každý vstupný tlak #1 veľká – malá; #2 podobné rozmery; #3 väčšia – menšia; #4 mimo záber; poloha pozorovanej oblasti: $Z = 25$ mm, $Y = 10$ mm; 120K; analyzovaných bolo 2000 snímok; doba medzi jednotlivými snímkami je 1 μ s.

p [MPa]	#1	#2	#3	#4	f [Hz]
0,5	12	7	4	7	1380
1,0	18	43	9	44	4200
1,5	19	94	10	55	7380

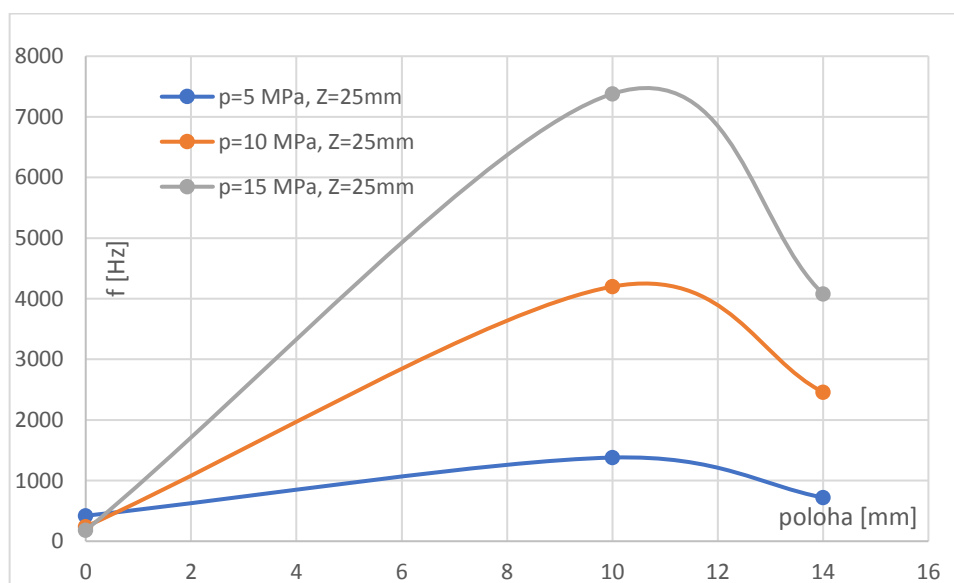
Pre niektoré režimy nebola dôkladná analýza možná, z dôvodu zlého nastavenia snímania vysokorýchlostnej kamery a nedostatočného osvetlenia. Analýzu skomplikovali aj faktory, ktoré ovplyvniť nemôžeme, ako napríklad prehustenie priestoru malými kvapkami, alebo pravidelné zatienenie veľkej oblasti pozorovaného rámčeka rozsiahlymi zhlukmi kvapaliny, obrázok 6-1. V niektorých prípadoch pomohlo vymedzenie pozorovaného poľa a postupné sčítanie na princípe superpozície. Tieto výsledky možno považovať za menej presné, ale v konečnom dôsledku splnili očakávané predpoklady.

Záverom vyhodnotenia je skutočnosť, že s rastúcim vstupným tlakom klesá priemer kvapiek, pretože dochádza k skoršiemu rozpadu na menšie časti. Dôsledkom je zvýšená odporová sila, ktorá prekoná veľkosť povrchového napätia držiaceho kvapku pohromade. Oblasť primárneho a sekundárneho sa so zmenšujúcimi kvapkami presúva bližšie k vrcholu trysky. Taktiež sa kvapalný film vo forme kužela s rastúcim tlakom čoraz viac otvára a zmenšuje svoju výšku. Keďže je sprej tvorený väčším počtom kvapiek, dochádza v každej oblasti k nárastu frekvencií interakcií (obr. 6-1 a graf 6-2), ktorý sme pozorovali so zvyšujúcim sa tlakom.

Z výsledkov bolo zhotovených 9 tabuliek (príloha 1), každá z nich predstavovala inú polohu v spreji pre všetky zvolené režimy vstupných tlakov. Keďže sme neboli schopní niektoré polohy analyzovať a nemali sme dostatočný počet parametrov (počet zrážok pre daný režim) na stanovenie frekvencie interakcií, bolo možné vytvoriť iba graf závislosti frekvencie na polohe s meniacou sa výchytkou vo vodorovnej ose Y (pre stálu súradnicu $Z = 25$ mm od vrcholu trysky).



Obr. 6-1 Príklady nevhodných režimov.



Graf 6-1 Závislosť frekvencie interakcií na polohe vo vodorovnej ose Y, poloha v ose Z je stála ($Z = 25$ mm).

7. Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámenie sa s technikou vysokorýchlostného obrazového záznamu, popis využitých zariadení a prevedenie samotného experimentu, ktoré vyústilo v potvrdenie stanovených teoretických predpokladov.

Na počiatku bolo potrebné zdokonaľiť vedomosti z oblasti pohybu kvapiek, dynamiky prostredia a zložitej geometrie používanej trysky, aby sme vôbec pochopili hlavnú podstatu problematiky. Na pomoc slúžili príslušné odborné články, knižky a osobné prednášky, ktoré si vzal na starosť vedúci práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

Následne prebehla praktická časť práce, ktorú predstavovalo meranie v špeciálne vybavenom laboratóriu sprejov, kde sú k dispozícii všetky potrebné zariadenia. Najmä vysokorýchlostná kamera Photron FASTCAM SA-Z, pomocou ktorej sme vytvorili makro-záznamy pohybu kvapiek a správania prostredia. Zistili sme, že sprej tvorený tvarom trysky je taktiež závislý na vstupnom tlaku.

Akonáhle sme vplyv tlaku na sprej dôkladne preskúmali, bola laboratórna činnosť ukončená a nastala detailná analýza kvapalného kužeľa pomocou zhotovených záznamov. Tieto zábery nám objasnili správanie kvapalného kužeľa, ktorý sa postupne formoval do 3 štádií. Každú jednu z týchto oblastí je možno popísať podľa dejov, ktoré v nej prebiehajú. Samotné zhľuky kvapaliny a kvapky do seba neustále vrážajú a vytvárajú rôzne druhy kolízií, ktoré boli predmetom nášho pozorovania. Vytvorili sme 4 typické skupiny interakcií v závislosti na veľkosti zrazených kvapiek, kde sme sledované zrážky zaraďovali. Kolízia vždy vyústi v nejaký výsledok, napríklad vznikne nová kvapka, preto bol pre každý typ vybraný príklad, na ktorom bol popísaný priebeh zrážky.

Problematiku možno poňať z viacerých uhlov. Stanoviť typy kolízií, ktoré v spreji nastávajú a popísať za akých okolností k nim dôjde. Ďalšou možnosťou je štatistické vyhodnotenie počtu zrážok za sekundu v podobe frekvencie pre každý režim. Keďže sme zistili, že s rastúcim tlakom sa znižuje priemer kvapiek, ktorými je priestor vyplnený, z toho dôvodu musí dochádzať k vyššiemu počtu zrážok za sekundu. V tabuľkách, nachádzajúcich sa v prílohe, nájdeme 9 rôznych oblastí kvapalinového kužeľa a pre každý režim bola čo najpresnejšie vyčíslená spomínaná frekvencia zrážok.

V priebehu práce sme sa stretli s niekoľkými problémami. Jedným z nich je, že sme nemali k dispozícii dostatočné osvetlenie. Využitie špeciálneho lasera by nám pomohlo s viditeľnosťou kvapiek na snímkach a nebola by nutná úprava v príslušných softvéroch. Analýza prebehla prezeraním niekoľkých tisícok snímok. V budúcnosti by sa tento zdĺhavý proces dal nahradiť využitím

programu, ktorý by na snímkach detekoval samotné interakcie za nás. K výsledkom, ktoré by boli presnejšie, by sme dospeli za výrazne kratšiu dobu.

Prínosom celej bakalárskej práce bolo najmä oboznámenie s problematikou procesov rozprašovania u tlakových vírivých trysiek a analýza vytvorených záznamov.

Zoznam použitej literatúry

- [1] JANÁČKOVÁ, L., 2016, "Vizualizace rozpadu kapaliny u rozprašovacích trysek" Bakalárska práca, Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- [2] KRISHNAN, K.G. a E. LOTH. Effects of gas and droplet characteristics on drop-drop collision outcome regimes. International Journal of Multiphase Flow[online]. 2015, 77, 171-186 [cit. 2016-11-14]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.08.003. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932215001755>
- [3] LEFEBVRE, A. H., 1988, "Atomization and sprays", Hemisphere Pub. Corp., New York. ISBN 0-89116- 603-3.
- [4] MALÝ, M., 2016, "Experimentální studie vlastností spreje a funkčnosti malých tlakových vířivých trysek", Diplomová práca, Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- [5] SANTOLAYA, J. L., J. A. GARCÍA, E. CALVO a L. M. CERECEDO. Effects of droplet collision phenomena on the development of pressure swirl sprays. International Journal of Multiphase Flow [online]. 2013, 56, 160-171 [cit. 2016-11-14]. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.06.007. ISSN 03019322. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932213000943>
- [6] "Photron", [Online], [cit. 25.5.2017]. dostupné z: <https://photron.com/>
- [7] "Laboratoř sprejů", [Online], <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/laborator-spreju>
- [8] "Přístrojové vybavení", [Online], [cit. 25.5.2017]. Dostupné na: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/photron-fastcam>
- [9] Fluent Incorporated, "Equation of Motion for particles", [Online], [cit. 25.5.2017]. Dostupné na: <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node661.htm>

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam značiek

Značka	Jednotka	Popis
D	m	priemer
f	Hz	frekvencia
g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	tiažové zrýchlenie
p	MPa	tlak
\ominus	$^{\circ}$	uhol théta
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rýchlosť
V	m^3	objem
v_m	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rýchlosť menšej kvapky
v_v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rýchlosť väčšej kvapky
Y	mm	vodorovná vzd. od vrcholu trysky
Z	mm	zvislá vzdialenosť od vrcholu trysky
μs	μs	mikrosekunda
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota
σ	Pa	napätie
u	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rýchlosť

Zoznam skratiek

120K	120 000 snímok za sekundu
2Ksnímok	počet snímok v jednej vzorke
px	pixel
shutter	závierka (doba medzi snímkami)
We	Weberové číslo

Zoznam príloh

Príloha 1 Tabuľky vyhodnotenia počtu zrážok pre všetkých 9 nameraných oblastí.

Prílohy

Príloha 1 Tabuľky vyhodnotenia počtu zrážok pre všetkých 9 nameraných oblastí.

p	Z=25 mm	Y=0 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	0	7	0	1	420	1
1,0	0	3	1	0	240	1
1,5	0	3	0	0	180	1

p	Z=50 mm	Y=0 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	3	1	0	2	240	1
1,0	0	1	0	2	60	1
1,5	-	-	-	-	-	1*

p	Z=12,5 mm	Y=0 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	-	-	-	-	-	1
1,0	-	-	-	-	-	0,35
1,5	-	-	-	-	-	0,35

p	Z=12,5 mm	Y=7 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	36	17	5	51	3480	1
1,0	132	76	20	156	13680	0,35**
1,5	160	126	73	204	21540	0,35**

p	Z=50 mm	Y=28 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	0	0	0	1	0	1
1,0	0	1	0	3	60	1
1,5	1	0	1	1	120	1

p	Z=25 mm	Y=10 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	12	7	4	7	1380	1
1,0	18	43	9	44	4200	1
1,5	19	94	10	55	7380	1

p	Z=50 mm	Y=20mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	0	1	0	1	60	1
1,0	1	5	1	9	420	1
1,5	1	0	0	2	60	1

p	Z=12,5 mm	Y=5 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	40	8	3	56	3060	1**
1,0	-	-	-	-	-	0,35*
1,5	-	-	-	-	-	0,35*

p	Z=25	Y=14 mm	120K	2Ksnímok	f	shutter
[MPa]	#1	#2	#3	#4	[Hz]	[μs]
0,5	5	5	2	8	720	1
1,0	19	12	10	32	2460	1
1,5	22	31	15	42	4080	1

* - slabé osvetlenie, nepomohol ani nižšia závierka (shutter), boli by nepresné výsledky

** - nepriamo vyhodnotené